

第46回

鉄道構造物の耐震設計

はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では、改めて地震の脅威を思い知らされました。震源域は幅約200km、長さ約500kmという広範囲なもので、地震の規模はモーメントマグニチュードで9.0となっており、東日本の広いエリアで強い揺れを記録しました。本地震では、津波や巨大な余震といった地震随件事象による被害も顕在化しました。また、浦安では、震源からかなり距離をおいた地域において大規模な液状化被害が発生しています。鉄道では、電車線柱の被害が多数見られ、復旧および列車運行再開に時間を要しました。これらには、いわゆる“想定外”と呼ばれる事象も含まれており、対策の必要性が各所で議論されています。一方では、新しい基準をベースに耐震設計・耐震補強がされている構造物では、古い構造物に比べて、被害が限定的であったことも報告

されており、現状の耐震設計の質の高さが垣間見える機会でもありました。

ここでは、上述のような地震におけるさまざまな事象を検討する際にベースとなる耐震設計の考え方を、その変遷とともに整理します。また、東北地方太平洋沖地震以降の動向も踏まえ、これからの耐震設計の方向性について説明します。

現在の耐震設計に関する整理

まずは、現在の耐震設計を理解する上で必要になる、性能照査型設計^{1),2)}などの考え方について示します。

一般的に性能照査型設計は、**図1**に示したような階層化された体系で説明されます。このモデルは、上階層で示される考え方や項目を実現するための具体的な手法が下階層で順次示されていく、ということを示したものとなっています。上位の2層（社会的な目的やそれを実現させるための構造物の機能に関する要求）が省令などにより示され、下位の2層が「鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計¹⁾」（以下、H24年耐震標準）により示されています。H24年耐震標準は、国交省から通達された鉄道構造物等設計標準（「性能表現による要求水準」に相当）に解説（「検証方法」および「適合みなし仕様」に相当）を加えて構成されたものです。性能照査型設

計における耐震設計では、まず構造物が保有すべき性能を踏まえて、適切な構造物を計画します。次に構造物の各諸元を設定し、この構造物が十分な性能を有することを「検証方法」により照査します。

さて、耐震設計において、その変遷も含めて整理する際には、地震作用、限界値および応答値算定手法に着目すると見通しが良くなります。まずは、性能照査型設計に対応したH24年耐震標準について概観します。

H24年耐震標準では、鉄道構造物の地震時の要求性能は「安全性について設定し、重要度の高い構造物については復旧性を考慮する」こととなっています。ここでは、安全性を例として詳細を示します。安全性は「想定される作用のもとで、構造物が使用者や周辺の人々の生命を脅かさないための性能」と定義されており、さらに、下記の2つに分類されています。

- ①地震時における構造物の構造体としての安全性：L2地震動に対して、構造物全体型が破壊しないための性能
- ②地震時における構造物の機能上の安全性：車両が脱線に至る可能性をできるだけ低減するための性能で、少なくともL1地震動に対して構造物の変位を走行安全上定まる一定値以内にとどめるための性能

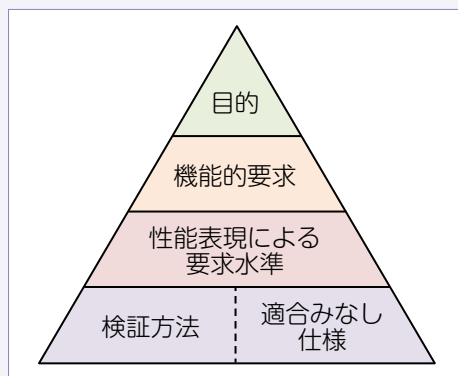


図1 性能照査型設計の階層化モデル

なお、上記に示されるそれぞれの設計地震動の定義は下記となっています。

L1地震動：構造物の建設地点で設計耐用期間内に数回程度発生する確率を有する地震動

L2地震動：構造物の建設地点で考えられる最大級の地震動

なお、復旧性についてもおおむねこの形式で、要求性能や地震作用が示されています。性能の表現も含めて、地震動や限界値が確定した数値ではなく、言葉により定義されている点が過去の耐震設計基準と異なる点です。つまり、設計者自らが解釈し、地震動や限界値を設定可能になっています。実際に、地震動については、地点ごとに地震動を作成し、設計を行う事例も増えてきているようです。

応答値の算定手法は、動的解析法を原則としています。地震動や限界値の考え方や統合すると、要求性能に合った設計地震動と構造物の限界状態を設定し、設計地震動を用いて数値解析などにより構造物の振動を模擬して、構造物の損傷状態を評価し、それが限界状態に達していないことを確認する、というのが概略的な設計計算のフローとなっており、プロセスが明快であることが分かります。

H24年耐震標準の解説には、設計者の利用の便を考え、上記原則に即した地震動として標準応答スペクトルやそれに適合する地震波が示されているとともに、この地震動の動的効果を評価した静的解析法による応答値算定法も示されています。次章において耐震設計の変遷を示しますが、その地震作用における参考として、**図2**にL2地震動の標準応答スペクトルと時刻歴波形を示します。海溝型の地震を想定したスペクトルIと内陸活断層による地震を想定したスペクトルIIがあり、これらは

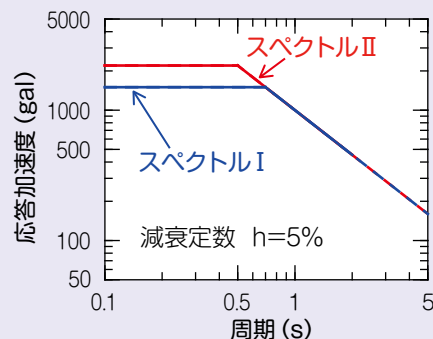
耐震設計上の基盤面（せん断弾性波速度 $V_s = 400\text{m/s}$ 程度の連続地層の上面）で設定されたものとなっています。この地震動は、例えば基盤が露頭しているような地点で等価固有周期が0.5秒の高架橋を考えた場合、弾性状態で2200galの応答加速度が発生するような地震動となっています。

耐震設計の変遷³⁾など

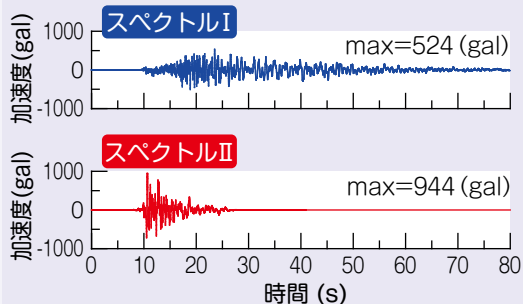
本章では、鉄道構造物の耐震設計の変遷を整理します。日本においては、1923年の関東大震災を受けて、耐震設計の考え方が設計基準に取り入れられました。この時導入されたのが「震度法」と呼ばれる手法で、構造物に対して静的水平力を考慮した設計法になります。震度法は、まず、1924年に改訂された「市街地建物法」に取り入れられましたが、設計基準に水平作用が規定されたのはこれが世界初でした。鉄道においては、1930年の「橋梁標準設計」に取り入れられています。

震度法は1916年に佐野利器博士により提案されたものであり、1891年の濃尾地震および1906年のサンフランシスコ地震による建築物の被害を踏まえたものとなっています。ここでいう震度は、気象庁が発表するような地震の揺れの大きさを表すものではなく、設計時に与える地震時の水平方向の荷重の自重に対する割合を示します。上記の「橋梁標準設計」では、考慮する設計水平震度を0.2と定めており、水平方向の荷重として自重の0.2倍を設定することを意味します。

性能照査型設計と比較すると、地震作用が設計水平震度0.2として明示さ



(a) 標準応答スペクトル



(b) 時刻歴波形

図2 L2地震動の標準応答スペクトルおよび時刻歴波形

れているのが特徴的です。また、この数値が要求性能を前提とせず、経験的に定められたという点も重要です。

この後、数々の地震被害を経験し、設計水平震度の見直しや、限界値としての許容応力度の整備、構造物の固有周期を考慮する修正震度法の導入などが行われます。そのほかにも、例えば、1979年の「耐震設計指針（案）」では、周期が2秒以上の構造物では動的解析法を実施することや、道路などのほかの土木構造物の基準に先駆けて、特殊地盤（軟弱地盤）において地盤変位の影響を基礎の設計に考慮する応答変位法も導入されました。そして、1992年の「鉄道構造物等設計標準（コンクリート構造物）」においては、限界状態設計法が導入されました。ここでは、設計水平震度は1.0となり、部材の塑性化まで考慮した手法を採用しています。ただし、応答値算定手法はあくまで静的解析法でした。この間の変遷の概略を表1に示します。

その後、1995年に発生した兵庫県南部地震による被害は甚大なもので、鉄道においてもJRの全線復旧まで約3ヶ月を要する被害となりました。この地震では鉄筋コンクリートラーメン高架橋などでは柱部の破壊により、床スラブの落下や桁の落橋に至る例が多く発生しました。図3に高架橋の被災事例⁴⁾を示します。この地震を受けて、性能照査型設計への移行が一気に進み、1999年に「鉄道構造物等設計標準(耐震設計)⁵⁾」が制定されました。この時に、土木学会の提言を受けて、L1地震動とL2地震動が導入されています。特にL2地震動は、「構造物の設計耐用期間内に発生する確率は低いが非常に強い地震動」と定義されるものであり、それまでの地震作用の考え方とは大きく異なります。また、性能照査型設計への対応として、耐震性能の考え方が整理されました。動的解析法を原則とした点も大きな変革でした。設計基準においてこれだけ大きな変革がなされたのは、それだけ兵庫県南部地震の影響が大きかったということを示しています。2012年には、上記標準の改訂版として、さらに性能照査型設計への

対応を推し進めたH24年耐震標準がまとめられました¹⁾。

性能照査型設計のメリット

耐震設計基準は、上記のような変遷を経て、性能照査型設計へと移行してきました。実務的な観点からは、仕様として設計手法が規定されている方が簡便で、性能照査型設計は難解だと考える技術者もいるでしょう。実際に、震度法は、簡便でかつ有効であることもあり、土木・建築の耐震設計法では長らくスタンダードな手法として使用されてきました。この震度法を基本とする耐震設計から脱却し、性能照査型設計へ移行することで得たメリットとは何だったのでしょうか。

最も強調される点は、新技術の導入がスムーズになることです。仕様規定型の設計体系においては、原則的に設計基準に仕様として取り入れられた技術を使用する必要があります。一方、性能照査型の設計では、性能を満足する技術であれば、ある程度の自由度を持って採用することが可能になります。例えば、ダンパーを使用した制振構造

のように、減衰を確保し、構造物の動的な応答を低減させるような手法は、静的な作用を与える震度法の設計体系では評価できず、採用が困難です。性能照査型の設計体系では、制振デバイスを表現可能な数値解析モデルを構築し、設定したL2地震動を入力して動的解析を実施することで、その有効性を直接的に評価することが可能です。

もう一つは、メリットというよりはマストな要求として国際規格への対応がありました。TBT協定により、強制規格は国際規格を基礎として制定することが定められています。具体的には、ISO 23469において、性能や設計地震動などについて標準化がなされており、H24年耐震標準はこれに準拠したものとなっています。国際規格に早い段階で対応することは国際的な競争力の醸成という面からも重要だと考えられます。

現在およびこれからの耐震設計

冒頭にも示しましたが、2011年の東北地方太平洋沖地震では、さまざまな被害が見られました。その中には、いわゆる想定外と分類される事象も存在しています。津波による被害は、その最たるものだったといえるでしょう。また、現在のL2地震動は「構造物の建設地点で考えられる最大級の地震動」(≠最大の地震動)として定義されてお

表1 震度法をベースとした耐震設計の変遷の概要

年代	設計基準などの名称	設計水平震度	備考(関連地震など)
1930年	橋梁標準設計	0.2	・関東大震災(1923)
1955年	無筋コンクリートおよび鉄筋コンクリート土木構造物の設計基準案	0.15~0.3	・東南海地震(1944) ・南海地震(1946) ・福井地震(1948) ・地域別の設計水平震度 ・許容応力度の設定
1961年	新幹線構造物設計基準案	0.2	
1970年	建造物設計標準(鉄筋コンクリート構造物及び無筋コンクリート構造物)	0.264(高さ10m以下の橋脚の例)	・基準水平震度×線区係数(重要度) ・基準水平震度=地域別震度×地盤別係数
1972年	全国新幹線網設計標準		・剛性規制・変位制限の考え方の導入(列車走行性の重視)
1974年	建造物設計標準(基礎構造物及び抗土圧構造物)		・新潟地震(1964) ・液状化判定
1979年	耐震設計指針(案)	0.25(最大)	・宮城県沖地震(1978) ・周期0.3秒以下:震度法 ・周期0.3秒以上:修正震度法 ・周期2.0秒以上:動的解析法 ・軟弱地盤における応答変位法の導入
1992年	構造物等設計標準・同解説(コンクリート構造物)	1.0	・限界状態設計法



図3 兵庫県南部地震での高架橋の被災事例

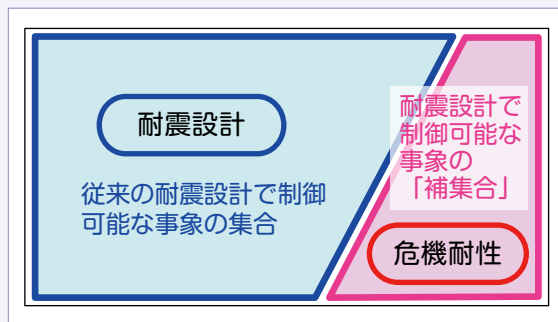


図4 危機耐性のイメージ

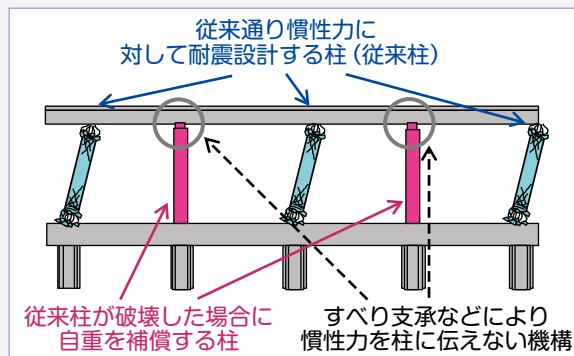


図5 自重補償機構を有する高架橋のイメージ

り、これを上回る地震動の発生を否定するものではなく、今後も想定外の地震被害を受けるリスクは残っています。

こういったリスクに対して、現在またはこれまでの耐震設計もある程度は対処してきました。例えば、高架橋の耐震設計では、高架橋部材の破壊形態を確認し、可能な限り曲げ破壊形態にするといった対応が取られています。これはぜい性的な破壊形態であるせん断破壊を避け、粘り強い破壊モードである曲げ破壊とすることで、想定以上の外力に対しても、直ちに構造物が崩壊することがないように配慮したものです。また、津波や地表面断層変位、そして余震のような地震随伴事象に対しては、構造計画により可能な限り、その影響を受けないように配慮することが求められています。

ただ一方で、上記のように、これまでに経験した事象に対応していく耐震設計のあり方の限界も、東北地方太平洋沖地震により浮き彫りになったといえます。極論をいえば、どれだけ大きな設計地震動を設定しても、ある規模の地震を想定して耐震設計をする以上、それを超える地震動によるリスクをゼロにすることはできません。これに対して、従来の性能照査に代表される耐震設計で制御できない部分を認め、対応していくことが必要ではないか、という議論がなされるようになりました。H24年耐震標準は、ほかの土木の基準

に先駆けて、「危機耐性」という用語を導入することにより、この考えを取り入れています。H24年耐震標準に実際に書かれた文言を抜粋すると、構造物が「想定以上の地震に対しても破滅的な被害に繋がらないような危機耐性を有することが望ましい」と記載されています。この危機耐性は図4のようなイメージで理解できます⁶⁾。これは、地震が発生することにより生じる事象には、耐震設計で制御可能な部分と、耐震設計で制御不可能な部分が存在し、従来の耐震設計で制御できない部分を危機耐性として考慮する必要があることを示しています。

耐震設計で制御できない部分への対応として、現在有効と考えられているのが「起こってはならない最悪の結果を想定し、それを防ぐような対処を行う」ということです。鉄道地震工学研究センターでは、例えば、想定を超える地震が発生した場合にも、高架橋で落橋が発生しないような構造として自重補償機構を有する高架橋のコンセプトを提案しています(図5)⁷⁾。これは、高架橋の柱部材として、従来通りの耐震設計を行う部材に加えて、それらの柱が破壊してしまった場合にも自重だけは補償する部材を導入する、というものです。自重補償柱は、例えば、柱の上端にすべり支承などのデバイスを設置し、上部工の水平挙動と柱を分離することで実現できると考えられます。

つまり、耐震設計を行った柱が破壊しても、破壊しないように設計された自重補償柱が上部工を支えることによって落橋を防ぐ仕組みです。

このような危機耐性は新しい概念であり、その実現にはまだまだ検討が必要な段階ですが、これからの耐震設計にさらなる変革をもたらすものであると考えられます。また、構造物の終局や崩壊挙動などの、現状で取り扱いが困難な部分にアプローチするものでも重要であり、設計技術の発展を促すものとなると期待されます。

(本山紘希／鉄道地震工学研究センター
地震応答制御研究室)

文献

- 1) 国土交通省監修, 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計, 丸善出版, 2012
- 2) 日本地震工学会: 性能規定型耐震設計 現状と課題, 鹿島出版, 2006
- 3) 公益社団法人土木学会 地震工学委員会: 実務に役立つ耐震設計入門, 丸善出版, 2011
- 4) 鉄道総合技術研究所: 兵庫県南部地震鉄道被害調査報告書, 鉄道総研報告, 特別第4号, 1996
- 5) 国土交通省監修, 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計, 丸善出版, 1999
- 6) 室野剛隆: 巨大地震に備えるー鉄道の耐震設計と危機耐性ー, 土木学会誌, 第100巻, 第7号, pp.24-27, 2015
- 7) 西村隆義, 室野剛隆, 本山紘希, 五十嵐晃: 危機耐性を高める自重補償構造の提案と成立性, 第18回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.299-304, 2015